

# **Optimización ambiental del trazado de corredores de carreteras con Sistemas de Información Geográfica**

**Manuel Loro Aguayo**

Investigador, Centro de investigación del transporte (TRANSyT-UPM), Madrid, España

**Rosa María Arce Ruiz**

Profesora, Centro de investigación del transporte (TRANSyT-UPM), Madrid, España

**Emilio Ortega Pérez**

Profesor, Centro de investigación del transporte (TRANSyT-UPM), Madrid, España

**Belén Martín Ramos**

Profesora, Centro de investigación del transporte (TRANSyT-UPM), Madrid, España

## **RESUMEN**

El diseño de una carretera requiere un detallado conocimiento del territorio, definiendo los grandes corredores topográficos existentes (llanuras, valles, mesetas, etc) y los posibles puntos de paso (puertos de montaña, desfiladeros, collados, etc). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas muy útiles para definir estos corredores, ya que permiten analizar diversos condicionantes con técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC).

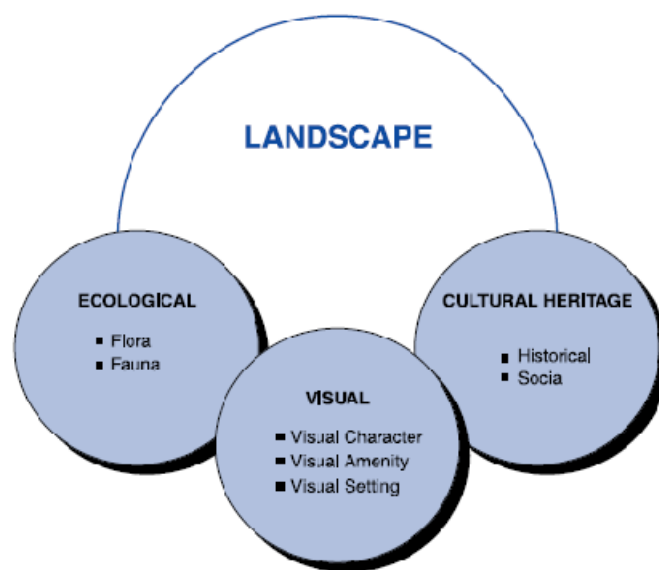
En el presente artículo se proponen indicadores que permitan la búsqueda de trazados de autopistas más respetuosas con los valores ambientales del territorio en general y en particular con el paisaje. El trabajo desarrollado se ha dividido en dos fases. En una fase inicial se han recopilado recomendaciones teóricas orientadas a la búsqueda de trazados más respetuosos, a partir de manuales de trazado y de integración paisajística. En una segunda fase se ha realizado una revisión y selección de aquellos indicadores territoriales que permiten cuantificar la capacidad de acogida del territorio e incorporar dichas recomendaciones en función de ésta.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Según la Real Academia Española de la Lengua, el paisaje puede definirse como “extensión de terreno que se ve desde un sitio”. Según la Convención Europea del Paisaje (2000), el paisaje se define como “la manera en que un área es percibida por la gente y cuyo carácter es el resultado de la acción y la interacción de factores naturales y/o humanos”. En estas definiciones se hace hincapié en dos conceptos. Por un lado, la existencia de un observador que valora lo que ve y, por otro lado, la existencia de un terreno que es visualizado. Esta definición se enmarca dentro de una definición de paisaje asociada a su carácter visual o estético.

Según Russo *et al.* (2011) la tendencia actual es incorporar el aspecto ecológico y cultural al estudio del paisaje. Según el Department of Main Road of Queensland (2004), el estudio del paisaje en el diseño de carreteras debe realizarse desde tres ámbitos preferentes (ver esquema de la Fig. 1):

- ✓ Visual: carácter estético de un área definida por cómo es percibida por los observadores.
- ✓ Ecológico: valor desde el punto conservacionista de la flora y la fauna de una determinada área.
- ✓ Cultural: significado histórico y sociocultural de una determinada área relacionada con la actividad del ser humano.



**Fig. 1. Esquema del concepto del paisaje en función de su visión visual, ecológica y cultural. Fuente: Department of Main Roads of Queensland (2004).**

La ventaja de englobar el enfoque visual y el ecológico en un mismo estudio es que muchos de los inputs necesarios pueden ser comunes en ambos casos. Tras este proceso, denominado definición de Unidades Homogéneas de paisaje (Gómez-Orea, 2004), se debe realizar un análisis de éstas con criterios diferentes.

En el presente artículo se hace una revisión de la interacción entre el paisaje y como éste se ve afectado en mayor o menor medida por la construcción de una carretera.

Para explicar este fenómeno y cómo puede reducirse este impacto, se ha estructurado el artículo con una primera aproximación al concepto de paisaje y cómo éste debe ser estudiado en la planificación de carreteras, ver apartado 2. Posteriormente, en el apartado 3 se han recogido las principales recomendaciones de trazado paisajístico encontradas en manuales especializados, orientadas a reducir dicho impacto.

En base a lo recogido en el apartado 3, en el apartado 4 se describen indicadores que permiten mejorar el conocimiento del terreno y así localizar qué tipo de trazados son más sostenibles desde el punto paisajístico.

Finalmente, en el apartado 5 se resumen las principales conclusiones obtenidas en la revisión realizada

## **2. EL ESTUDIO DEL PAISAJE EN LA PLANIFICACIÓN DE CARRETERAS**

La construcción de una autovía conlleva unas afecciones al paisaje directamente relacionadas con la calidad y fragilidad de las zonas atravesadas. Por ello, es indudable que se trata de un factor a tener en cuenta y que plantea limitaciones claras a la ubicación de la vía. La consideración del paisaje lleva implícito valorar los recursos que lo originan y en particular la vegetación, el relieve o la hidrografía, entre otros criterios (Department of Main Roads of Queensland, 2004).

En el proyecto de construcción y planificación de una carretera y especialmente durante el proceso de definición y ajuste de trazado, se ha de plantear la relación que cada vía mantiene con el carácter del paisaje y cómo puede resolverla con el menor conflicto (Español *et al.*, 2008). Así, en el proceso de planificación de una carretera debe conocerse con detalle dicho paisaje, clasificarlo en unidades con características similares y evaluar la relación entre éstas y los diferentes tramos de la carretera. En este proceso se debe tener en cuenta no solo la apariencia visual del paisaje, sino también los criterios de sostenibilidad ecológica y de conservación de los valores culturales (Ministerio de Fomento-Esteyco, 1999).

En la definición de alternativas se puede conseguir un análisis más preciso de la obra, que pese a que ya ha establecido un trazado longitudinal claro, el ancho del corredor (de hasta 1 km en algunos casos) permite modificar el trazado unos cientos de metros, en función de la proximidad a elementos significativos del paisaje (formaciones geológicas de interés, árboles monumentales, masas arboladas de interés, reducción de taludes) y a otros criterios ambientales (fragmentación, afección a condicionantes abióticos de interés) o culturales (proximidad a bienes de interés cultural).

En esta fase debe realizarse un adecuado estudio del relieve y de la escenografía (unidades visuales, cuencas de intervisibilidad, etc.). Junto a este análisis escénico debe realizarse un análisis ambiental del territorio y completarse con un estudio sobre el carácter del paisaje en diferentes escalas de análisis, ya que los resultados pueden variar dependiendo de la escala de estudio que se escoja en el análisis (Elsa, 2002).

Según el manual de trazado paisajístico de Transit-New Zealand (2006), los principales pasos en un estudio de paisaje orientado a diseñar una carretera son:

1. Describir los atributos que caracterizan el paisaje y cómo cuantificarlos.
2. Identificar posibles interacciones entre la carretera y el paisaje (impactos paisajísticos).
3. Realizar estudios detallados de las interacciones previstas (visibilidad, fragmentación de ecosistemas, etc).
4. Buscar un diseño de la carretera que reduzca el impacto paisajístico y que facilite la aplicación de medidas de integración.
5. Establecer medidas correctoras para reducir los impactos que no pudieron ser evitados en la fase de diseño.

En relación con la integración paisajística de infraestructuras, cabe destacar diversos trabajos orientados a la percepción del paisaje desde la carretera (Ode *et al.*, 2009; I. Otero *et al.*, 2006), así como la búsqueda de una mejor integración de infraestructuras observadas desde el exterior (Arce *et al.*, 2004; Bagli *et al.*, 2010; Bonachea *et al.*, 2005; Casermeiro *et al.*, 2000; Otero *et al.*, 2009; Tolon *et al.*, 2010).

### **3. RECOMENDACIONES DE DISEÑO DE CARRETERAS CON CRITERIOS PAISAJÍSTICOS. BUSQUEDA DE UN DISEÑO MEJOR ADAPTADOS AL TERRENO.**

El objetivo de cualquier diseño paisajístico de un corredor de transporte es crear un diseño respetuoso con las formas del entorno. Con este fin, en el trazado de una carretera es importante que se establezca de acuerdo a las condiciones visuales del territorio para poder incorporar criterios respecto a su exposición u ocultación del proyecto.

La carretera que mejor se integra en el paisaje es aquella que requiere un menor volumen de movimientos de tierra. Este objetivo no es fácil de conseguir, pues depende del relieve y la necesidad de reducir los costes de tiempo y de construcción. Además, no debe obviarse la necesidad de seguir unos estándares de seguridad y confort fijados por la normativa de carreteras, lo cual hace que aumente la superficie de ocupación de forma lineal en un terreno con características no lineales (Cañas, 1995).

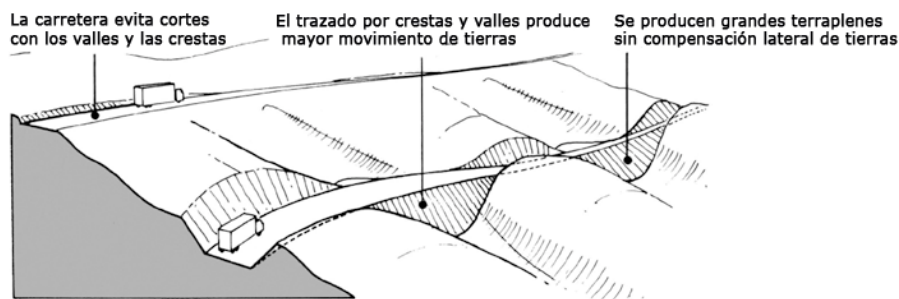
Para reducir este impacto se debe intentar la compensación de tierras para evitar la necesidad de demanda de préstamos o vertederos, lo que conduciría a una ocupación de suelo adicional (Ministerio de Fomento-Esteyco, 1999; Highways Agency, 1992).

A continuación se agrupan diferentes recomendaciones de trazado con criterios paisajísticos en diferentes zonas de estudio. Estas zonas se han agrupado en función de la clasificación del terreno con criterios geomorfológicos.

### 3.1 Trazados en ladera

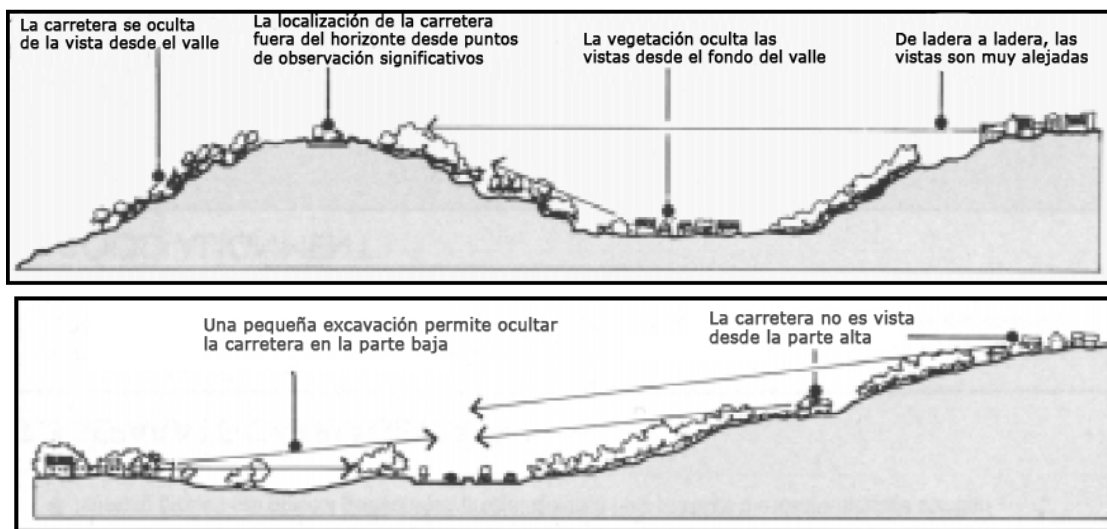
En este tipo de terrenos, el trazado debe buscar las laderas homogéneas, evitando cortar en línea recta laderas con ondulaciones, lo que permite, incluso, “esconder” mejor la carretera, ya que se reduce el número de taludes y su dimensión. La dificultad reside en buscar laderas homogéneas donde definir el trazado, ya que éstas se suelen localizar en zonas próximas a las vegas o zonas de piedemonte, donde normalmente se sitúan las mejores tierras de cultivo y el río, por tanto, conviene situar la traza a media ladera (Español *et al.*, 2008), ver Fig. 2.

Si el terreno tiene una fuerte pendiente y debe ser atravesado por la carretera, puede considerarse el diseño independiente de las dos calzadas en autopistas, de forma que se reduzcan los movimientos de tierras y se eviten las pendientes excesivas o la afección a zonas medioambientalmente más sensibles (AASHTO, 1991; GISA, 2009).



**Fig. 2. La búsqueda de laderas menos onduladas consigue reducir el tamaño de los taludes. Fuente: modificado a partir de Highways Agency (1992).**

Otro aspecto a tener en cuenta en el diseño del trazado es evitar que los trazados a media ladera se sitúen por encima de zonas urbanas, de manera que el impacto visual y sonoro se reduzca (Español *et al.*, 2008), ver Fig. 3.



**Fig. 3. Es importante localizar el trazado por debajo de núcleos urbanos. Fuente: modificado a partir de Highways Agency (1992).**

### 3.2 Trazados en fondos de valle

El trazado de carreteras por el fondo de los valles puede ayudar a reducir el movimiento de tierras de forma considerable, pero introduce un mayor impacto en las proximidades de los ríos y en la vegetación de ribera. Además, desde las laderas del valle, la presencia de la carretera en el fondo del valle puede provocar un importante impacto visual, a menos que sea correctamente diseñada (Highways Agency, 1992).

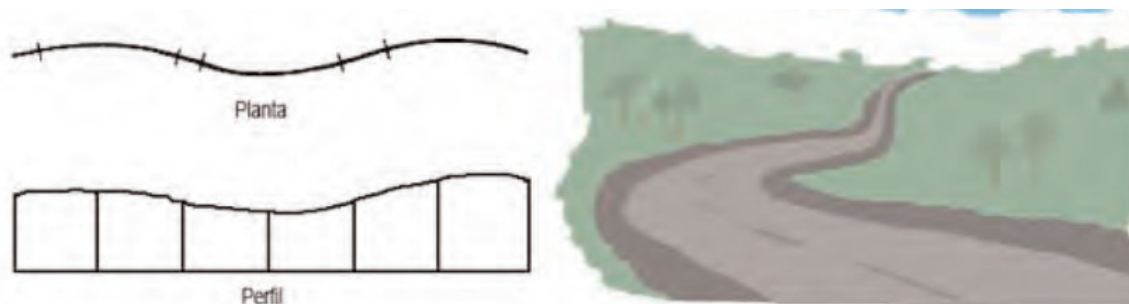
Las carreteras que mejor se adaptan a esta circunstancia son aquellas que transcurren por las laderas del valle con poca inclinación y, cuando ésta aumenta considerablemente, se diseñan por el lateral del valle (charnela o borde superior de la vega), ver Fig. 4. En todo momento la traza debe ir a un lado del río, evitando que se corte de forma sucesiva, siendo interesante crear motas artificiales que mejoren su integración paisajística.



**Fig. 4. Ejemplo de trazado de la carretera A-1075 por zona de piedemonte, consiguiendo reducir la afección a la zona de vega. Fuente: Español *et al.* (2008).**

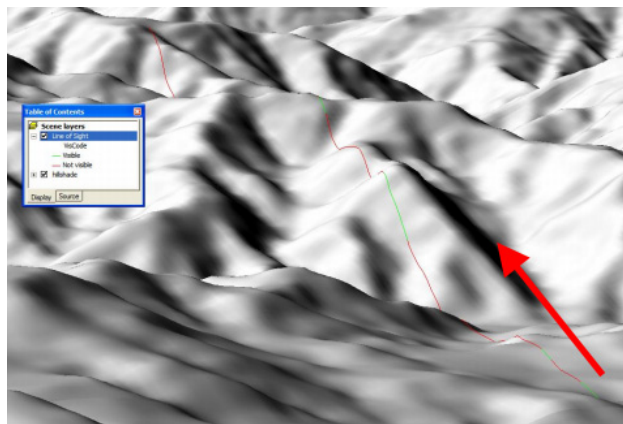
### 3.3 Trazado en zonas onduladas

Según indica el manual de GISA (2009) para el diseño del perfil longitudinal de la carretera en zonas onduladas, deben coincidir las curvas verticales (en el perfil longitudinal) y las horizontales (en planta) en longitud y conectar en los puntos de máxima y mínima cota. Además, debe evitar curvas verticales en las alineaciones rectas para evitar cambios de rasante. De esta manera, se consigue un trazado más fácil para el conductor, minimizándose la desorientación de éste, ver Fig. 5.



**Fig. 5. Buen ejemplo de coordinación entre el trazado en planta y el perfil longitudinal para conseguir una conducción más segura. Fuente: GISA (2009).**

Una vez está definido el trazado de la carretera, la utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden ser de gran utilidad en el estudio de los tramos que plantean problemas de visibilidad al conductor. Lo recomendable es que estos tramos se modifiquen para mejorar la visibilidad durante la construcción o se incluyan elementos como las plantaciones que mejoren la legibilidad de la carretera. En Fig. 6 se muestra cómo a partir de la herramienta Línea de visión o *Line of Sight* disponible en la mayoría de los SIG comerciales, puede conocerse qué tramos son observados por el conductor en cada uno de los puntos del trazado. Esta metodología ha sido utilizada con éxito por Castro *et al.* (2011) para estudios de seguridad vial basados en la visibilidad en la autopista M-607 (Madrid). Si estudios similares a este se incluyen en el análisis previo del corredor en una fase previa al trazado de alternativas, es posible mejorar la seguridad vial del trazado *a priori*.



**Fig. 6.** La polilínea 3D almacena la información de visibilidad (visible y no visible). Opcionalmente puede generarse un shapefile de puntos que indican la primera obstrucción encontrada para aquellos segmentos cuyos destinos no son visibles. Fuente: Barrientos (2008).

### **3.4 Modificación de la cota rasante de la carretera respecto del terreno**

En algunas circunstancias es recomendable que la cota de la rasante de la carretera no se ajuste al terreno. Esto supondrá un aumento de los costes de construcción de la infraestructura, pero, en ocasiones, permitirá reducir impactos ambientales de gran importancia como son la pérdida y fragmentación de ecosistemas, la reducción de la afección por ruido a la población próxima a la vía o la afección a zonas con alto interés para el planeamiento urbano, entre otros. A continuación, se describe con mayor detalle en qué circunstancias es recomendable la disminución o la elevación de la cota rasante de la infraestructura respecto del terreno.

#### **3.4.1. Disminución de la cota de la rasante**

Se debe procurar aprovechar las formas del terreno natural para ocultar la carretera a los receptores de las poblaciones cercanas a la vía y, a la vez, para ocultar zonas degradadas a



los usuarios de la carretera. Pese a ello, hay que conseguir un cierto equilibrio entre “ocultar” o disimular la carretera y ofrecer buenas vistas al usuario. Las vistas panorámicas, los hitos topográficos, los edificios o cualquier otro elemento significativo permiten lo que podríamos llamar la “lectura” del territorio y ayudan a la orientación del conductor (Ministerio de Fomento-Esteyco, 1999; Highways Agency, 1992).

Una posible solución son los trazados en trinchera en zonas alomadas que atraviesan zonas urbanas situadas por encima de la rasante, ya que consiguen aislar la vía del entorno (reducción de ruidos). Además, permite instaurar pasos a nivel de la zona urbana con mayor facilidad (AASHTO, 1991).

Los tramos en trinchera son solamente justificables cuando el coste de excavación no es muy alto y existe una posible compensación de tierras según el perfil longitudinal. No se debe olvidar que la altura de excavación debe ir desde los 4,5 m para ocultar todo tipo de vehículos, hasta los 2 m en el caso de los coches (Highways Agency, 1992).

Otra solución, en caso de tratarse de pequeños tramos de trinchera en zonas con interés agrícola, natural o urbanístico, es recurrir a falsos túneles para evitar el efecto barrera y mantener la continuidad del uso existente antes de la construcción de la carretera.

### **3.4.2. Elevación de la cota de la rasante**

Escoger un buen trazado puede ayudar a minimizar los impactos de la carretera en el medio. En la medida de lo posible, la carretera no debe destacar en el horizonte (GISA, 2009). Pese a ello, existen zonas donde interesa elevar su cota respecto al terreno para conseguir una reducción de otros impactos diferentes al paisajístico (reducción de fragmentación, afección a tierras con alto valor productivo, reducción de la afección a cauces, etc).

En el caso de que la alineación de la carretera siga los límites de zonas con usos de suelo diferente, existen casos en los que ese aislamiento visual es interesante. Un ejemplo de ello sería la separación visual entre una zona industrial y una zona residencial. Otro ejemplo es cuando la construcción de un viaducto permite reducir la fragmentación de zonas naturales de interés o permite el desarrollo de zonas urbanas con suelos con alto valor en la planificación urbanística de la zona (AASHTO, 1991).

Además de tener en cuenta las recomendaciones descritas en el apartado 3.2. en relación al trazado en fondos de valle, en caso de necesitar cruzar transversalmente un valle, hay que evitar ocupar la llanura de inundación e ir cortando el río de forma perpendicular. Para ello, lo recomendable es escoger bien la zona de cruce de cauces y valles. Normalmente es preferible elegir un punto estrecho que una zona en la que el valle sea más ancho.



#### 4 LA GEOMORFOMETRÍA APLICADA AL DISEÑO DE CARRETERAS CON CRITERIOS PAISAJÍSTICOS

Tras revisar las principales recomendaciones paisajísticas en el trazado de infraestructuras de transporte de tipo lineal, se ha comprobado la importancia de un adecuado conocimiento previo del terreno para poder definir qué tipo de trazado debe elegirse para conseguir un trazado que se adapte mejor al terreno. Como se ha indicado, la alineación y el perfil de la calzada se establecen al inicio del proceso de diseño y, por tanto, estas primeras decisiones realmente son el primer paso en la integración ambiental de una infraestructura. Además, la forma del terreno tiene una gran influencia en la percepción del conductor de la carretera y el paisaje circundante (Mark & Marek, 2009), consiguiéndose incluso mejoras en la seguridad vial de la carretera.

Con este fin, los SIG son herramientas que pueden ayudar al ingeniero en su labor de análisis, especialmente a partir de la información disponible de la superficie del terreno de la zona donde se proyecta la carretera. Dentro de las múltiples aplicaciones existentes en esta área, cabe destacar el campo de los estudios geomorfométricos con la utilización de indicadores implementables fácilmente en un SIG.

Dentro de la rama de la geomorfología cuantitativa se encuentra la geomorfometría. Esta ciencia reúne diversas técnicas de procesamiento matemático, estadístico y de imagen que pueden ser utilizadas para cuantificar los aspectos morfológicos, hidrológicos, ecológicos, paisajísticos o de otra índole de la superficie terrestre (Pike *et al.*, 2009). Por consiguiente, es una aproximación cartográfica, moderna y analítica, que representa la topografía de la Tierra a través del análisis informático centrada en el análisis de la cota del terreno. Para ello, se centra en la extracción de parámetros de la superficie terrestre, a partir de los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE). Un MDE es un raster donde todas sus celdas o píxeles poseen un valor de elevación que se aproxima a la superficie terrestre de forma continua, frente a otros datos de tipo discreto como son los contornos (curvas de nivel, por ejemplo) o las redes irregulares de triángulos (TIN, Triangulated Irregular Network) (T. Hengl & Evans, 2009).

A partir de los MDE y mediante la utilización de los SIG pueden realizarse diferentes análisis morfométricos donde se definen parámetros y objetos de interés de la superficie terrestre.

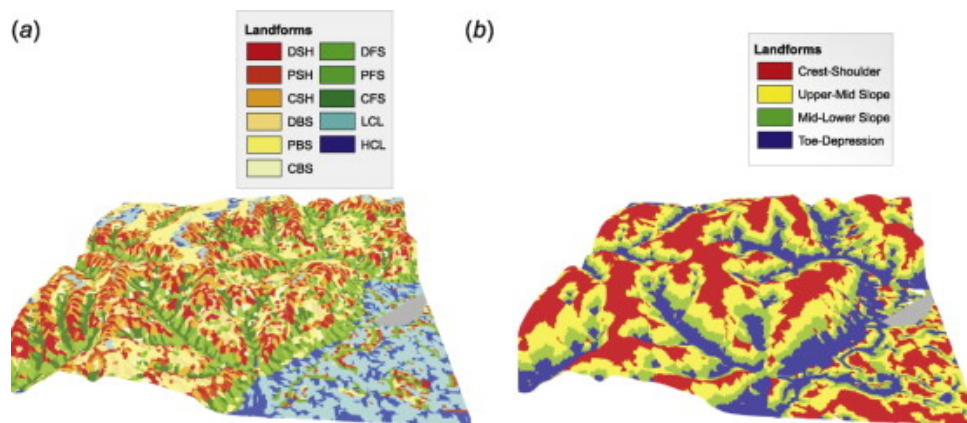
Los parámetros morfométricos locales se basan en la relación existente entre los valores que toman los diferentes píxeles vecinos en torno a un píxel o *neighbourhood operation*. Esta operación consiste en realizar un análisis matricial regular por todo el raster (también conocido como *filter window*), repitiendo una fórmula matemática en cada píxel.

En función de la metodología de análisis seleccionada, la superficie del terreno puede

estudiarse a partir, no solo de la interrelación entre valores de altitud del MDE, sino de parámetros obtenidos de la primera y segunda derivada de la función matemática que representa la superficie del terreno. En la Tabla 1 se muestran algunos indicadores que pueden utilizarse como descriptores del terreno, de cara a una posterior adaptación del trazado en función de criterios paisajísticos.

Las distintas formas del terreno pueden clasificarse en base a parámetros morfométricos o mediante análisis locales similares a los empleados para obtener estos (Olaya & Conrad, 2009) Es por ello que resulta clave la elección de una escala de análisis que se corresponda con el estudio del relieve que pretendemos realizar, ya sea este a nivel de microtopografía (*landform type*) o de macrorelieve (*landform facet*).

Una vez que las formas del terreno son identificadas con parámetros locales, el siguiente paso es clasificar sus diferentes subtipos o *landform facets* en función de parámetros regionales para completar el estudio. La combinación de los parámetros locales (convexidad y concavidad) y regionales (posición relativa de la pendiente, por ejemplo) permite definir elementos geomorfológicos con límites bien definidos como: zonas bajas y altas de la ladera, crestas, cabalgaduras (collados), colinas, depresiones o valles (MacMillan *et al.*, 2000). En la Fig. 7, se muestran algunos ejemplos de clasificaciones del terreno que podrían utilizarse durante el proceso de trazado de una carretera.



**Fig. 7. Clasificación del terreno a partir de la metodología de Pennock *et al.* (2001) (izda) y MacMillan y Pettapiece (1997) (dcha). Fuente: Reuter y Nelson (2008).**

Nombre	Métodos de cálculo	Descripción
<i>Slope</i>	Evans (1972) Zevenbergen y Thorne (1987)	Refleja la tasa de mayor cambio entre los valores de elevación. Es el ángulo existente entre el vector gradiente en un píxel y la proyección horizontal del mismo.
<i>Terrain Shape Index (TSI) o Microscale landform</i>	McNab (1989)	Variable que cuantifica la convexidad o concavidad a nivel de microescala. Los valores bajos de TSI indican una ubicación en una colina escarpada con pendientes laterales, mientras que valores altos de TSI significa que es un barranco.
<i>Landform Shape Index o Landscape exposure (LFI)</i>	McNab (1993)	Mide la concavidad y la convexidad de los puntos de una superficie mediante el cálculo de las medias de las pendientes en los 8 píxeles vecinos. Analiza la exposición de una zona en relación con el relieve de ésta. Los valores bajos de LFI indican que un sitio está en una cresta expuesta, mientras que los valores altos de LFI indican que el sitio está en un valle protegido.
<i>Topographic Position Index (TPI) o Topoindex</i>	Felicísimo (1994), Sánchez <i>et al.</i> (1998), Zimmermann <i>et al.</i> (1999), Jenness (2004), Jenness (2011).	Estima la variabilidad de elevaciones o pendientes en un área analizada. Los valores de alta varianza corresponderán a zonas con alta rugosidad.
<i>Topographic Ruggedness Index (TRI)</i>	Riley, <i>et al.</i> (1999)	TRI mide la variabilidad del paisaje píxel por píxel. Los valores bajos de TRI indican una superficie plana (que indica el sitio más expuesto), mientras que los valores altos indican que hay grandes cambios en la elevación entre píxeles vecinos (que indica el sitio más protegido)
<i>Factor de rugosidad de la superficie del terreno (SRF)</i>	Hobson (1972)	Primera aproximación a la rugosidad del terreno a partir de la orientación, la pendiente y el tamaño de píxel.
<i>Shape Complecity Index (SCI)</i>	Hengl <i>et al.</i> (2003).	Indicador discreto. Establece si el polígono es compacto u ovalado en función de la relación del área y del perímetro. Los picos suelen ser más ovalados mientras que los valles y las zonas de crestas tienen forma más longitudinal.

**Tabla 1– Parámetros descriptores del terreno obtenidos de la primera y segunda derivada de la ecuación que define el terreno. Fuente: elaborado a partir de Olaya (2009) y Gruber y Peckham (2009).**

## 5. CONCLUSIONES

El paisaje es una variable ambiental que cada vez está adquiriendo más importancia en el diseño de carreteras, pero la cartografía que la administración y el mundo académico está elaborando, aún no tiene el detalle suficiente para su correcta adaptación a la escala de trabajo (1:10.000 como mínimo) de la fase de trazado de alternativas (fase A del Estudio Informativo). Pese a que se han desarrollado metodologías complementarias basadas en el estudio de fotografías del paisaje (información puntual del paisaje), lo más habitual es que el trazadista trabaje con cartografía (información más global), ya que le permite ir diseñando la nueva carretera sobre ésta.

El principal inconveniente de trabajar con cartografía paisajística es que ésta se elabora a partir de información temática que difícilmente tiene una escala superior a 1:25.000.

En el caso concreto del diseño de carreteras, esta cartografía paisajística es fácilmente mejorable a partir un nuevo análisis basado en el MDE que se elabora para adaptar la información temática a la escala de diseño de la infraestructura.

Al disponer de un MDE con una escala de detalle superior, es posible realizar un análisis geomorfológico del territorio a partir de indicadores. Como ya se ha mencionado, a partir de éstos puede clasificarse el territorio, estableciéndose límites claros entre las diferentes formas que lo componen. Así, no solo se puede mejorar la definición de las Unidades Homogéneas de paisaje en el estudio de corredores, sino que pueden incorporarse en el proceso de trazado de las alternativas en cada uno de éstos.

Las recomendaciones aplicables a la búsqueda de un trazado más integrado en el paisaje son claras y conceptualmente fáciles de comprender. El principal inconveniente es definir cómo pueden llevarse al proceso de diseño de una carretera, ya que muchas de estas recomendaciones están orientadas a la evaluación de un trazado propuesto. No debemos olvidar que las que conocemos como medidas de integración paisajística en carreteras suelen estar centradas en las plantaciones en los márgenes de éstas. Estas medidas son de escasa relevancia en la mejora paisajística si se compara con los resultados obtenidos mediante una adecuada selección de traza, rasante y sección transversal de la carretera que consiga ajustarse a la forma del terreno.

Actualmente, el único parámetro que se utiliza en los Estudios Informativos en España para definir la forma del terreno es la pendiente. Según lo mostrado en esta comunicación, existen otros parámetros que podrían incluirse para mejorar el conocimiento del terreno, especialmente si se asocian recomendaciones de trazado basadas en criterios paisajísticos de diseño.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo resume la primera fase de un proyecto mayor, el proyecto “MILL Modelo de integración del trazado de Infraestructuras lineales en el paisaje basado en SIG”, TRA2010-18311, perteneciente a la Convocatoria de ayudas a proyectos de I+D 2010 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

## REFERENCIAS

AASHTO. (1991). *A guide for Transportation Landscape and Environmental Design*. American Association of State Highway and Transportation Officials.

Arce, R. M., Álvarez, G., & Sorribes, C. (2004). *Sistemas de Información Geográfica y localización de actividades en el territorio*. Ed. Segunda Edición. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Bagli, S., Geneletti, D., & Orsi, F. (2010). Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review, In Press, Corrected Proof*.

Barrientos, M. (2008). *3D Analyst. Arctoolbox: guía rápida de herramientas*. El autor. [http://www.gabrielortiz.com/descargas/3D\\_Analyst\\_9\\_2.pdf](http://www.gabrielortiz.com/descargas/3D_Analyst_9_2.pdf)

Bonachea, J., Bruschi, V. M., Remondo, J., González-Díez, A., Salas, L., Bertens, J., *et al.* (2005). An approach for quantifying geomorphological impacts for EIA of transportation infrastructures: a case study in northern Spain. *Geomorphology*, 66 (1-4).95-117.

Cañas, I. (1995). *Introducción al Paisaje* Unicopia. Madrid.

Casermeyro, M. A., Pantojo, I., Moreno, S., & Mayo, M. (2000). Criterios ambientales para la selección de un sistema de información geográfica en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras lineales. *Informes De La Construcción.*, 52-468.

Castro, M., Iglesias, L., Sánchez, J. A., & Ambrosio, L. (2011). Sight distance analysis of highways using GIS tools. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19 (6).997-1005.

Department of Main Roads of Queensland. (2004). *Road Landscape Manual*. Queensland Government. Queensland (Australia).  
<http://www.tmr.qld.gov.au/Business-industry/Technical-standards-publications/Road-landscape-manual.aspx>

Elsa, J. (2002). How scale affects environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 22 (4).289-310.

Español, I., Álvarez, D., Fernández, D., & González, C. (2008). *La carretera en el paisaje. Criterios para su planificación, trazado y proyecto* Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.

Evans, I. S. (1972). General Geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In Harper & Row (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology* (pp. 17-90) R.J. Chorley.

Felicísimo, M. A. (1994). *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Pentalfa. Oviedo.

<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>

GISA. (2009). *Libro de Estilo de las Carreteras Catalanas* Generalidad de Cataluña. Departamento de Política Territorial y Obras Públicas. Barcelona.

Gruber, S., & Peckham, S. (2009). Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. *Developments in Soil Science* (pp. 171-194) Elsevier.

Hengl, T., & Evans, I. S. (2009). Chapter 2 Mathematical and Digital Models of the Land Surface. *Developments in Soil Science* (pp. 31-63) Elsevier.

Hengl, T., Gruber, S., & Pika, D. (2003). *Digital Terrain Analysis in ILWIS*. Lecture notes, International Institute for Geo-Information Science & Earth Observation (ITC). Enschede. [http://www.itc.nl/library/Papers\\_2003/misca/hengl\\_digital.pdf](http://www.itc.nl/library/Papers_2003/misca/hengl_digital.pdf)

Highways Agency, Scottish Executive. (1992). *Design Manual for Roads and Bridges. New Roads. Landform and Alignments. Vol. 10. Section 1*. Welsh Assembly Government and. The Department for Regional Development Northern Ireland. <http://www.standardsforhighways.co.uk/dmrb/>

Hobson, R. D. (1972). Surface roughness in topography: a quantitative approach. In Harper & Row (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology* (pp. 221-245) R.J. Chorley.

Jenness, J. (2004). Calculating landscape surface area from digital elevation models. *Wildlife Society Bulletin*, 32 (3).829-839.

Jenness, J. (2011). *DEM Surface Tools v. 2.1.292*. Jenness Enterprises. [http://www.jennessent.com/arcgis/surface\\_area.htm](http://www.jennessent.com/arcgis/surface_area.htm)

MacMillan, R. A., & Pettapiece, W. W. (1997). Soil Landscape Models: automated landscape characterization and generation of soil-landscape models. *Agriculture and Agri-Food Canada, Research Branch*.

MacMillan, R. A., Pettapiece, W. W., Nolan, S. C., & Goddard, T. W. (2000). A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs,

heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 113 (1). 81-109.

Mark, A., & Marek, P. E. (2009). *Landscape and Aesthetics Design Manual*. Texas Department of Transportation. USA.

[http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/lad/topography\\_and\\_grading.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/lad/topography_and_grading.htm)

McNab, W. H. (1989). Terrain shape index (TSI): quantifying effect of minor landforms on tree height. *Forest Science* (35). 91-104.

McNab, W. H. (1993). A topographic index to quantify the effect of mesoscale landform on site productivity. *Canadian Journal of Forest Research*. 23.1100-1107.

Ministerio de Fomento-Esteyco. (1999). *Guía Metodológica para la inclusión de proyectos ambientales en los proyectos de carreteras*. Dirección General de Carreteras, Subdirección General de proyectos. Madrid.

Ode, Å., Fry, G., Tveit, M. S., Messenger, P., & Miller, D. (2009). Indicators of perceived naturalness as drivers of landscape preference. *Journal of Environmental Management*, 90 (1). 375-383.

Olaya, V. (2009). Basic Land-Surface Parameters. *Developments in Soil Science* (pp. 141-169). Elsevier.

Olaya, V., & Conrad, O. (2009). Chapter 12 Geomorphometry in SAGA. *Developments in Soil Science* (pp. 293-308) Elsevier.

Otero, I., Cañas, I., Esparcia, P., Navarra, M., Martín, M. C., & Ortega, E. (2006). La carretera como elemento de valor paisajístico y medioambiental. Captación del valor del paisaje a través de la carretera. *Informes de la Construcción*, 58 (39-54).

Otero, I., Varela, E., Mancebo, S., & Ezquerro, A. (2009). Analysis of visibility in the assessment of the environmental impact of new constructions. *Informes de la Construcción*, 61 (515).67-75.

Pennock, D., Walley, F., Solohub, M., Si, B., & Hnatowich, G. (2001). Topographically controlled yield response of canola to nitrogen fertilizer. *Soil Science Society of America Journal*, 65 (6).1838-1845.

Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). Geomorphometry: A Brief Guide. *Developments in Soil Science* (pp. 3-30) Elsevier.

Reuter, H. I., & Nelson, A. (2008). Chapter 11 Geomorphometry in ESRI Packages. *Developments in Soil Science* (pp. 269-291) Elsevier.

Riley, S. J., DeGloria, S. D., & Elliot, R. (1999). A terrain ruggedness index that quantifies



topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5 (1-4).

Russo, P., Carullo, L., Riguccio, L., & Tomaselli, G. (2011). Identification of landscapes for drafting Natura 2000 network management plans: A case study in Sicily. *Landscape and Urban Planning*, 101 (3). 228-243.

Sánchez, F., Tejero, R., & Bergatín de la Viña, J. F. (1998). Análisis de la variabilidad del relieve a partir de Modelos Digitales del Terreno. *Rev. Soc. Geol. España.*, 11 (1-2). 139-149.

Tolon, A., Otero, I., Perez, P., Ezquerro, A., & Lastra, X. (2010). Bases for Building a Sustainability Indicator System for Transport. *Highway and Urban Environment*, 17. 49-57.

Transit New Zealand. (2006). *Guidelines for Highway Landscaping*. NZ Transport Agency. New Zealand.

Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*,

Zimmermann, N. E., & Kienast, F. (1999). Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: species versus community approach. *Journal of Vegetation Science*, 10 (469-482).